

# 5.2GHz帯上空利用の不要発射による 5.3GHz帯気象レーダーへの影響

---

令和6年9月30日  
事務局

# シミュレーション実施の目的について

## シミュレーション実施の目的

- ▶ 令和5年度 無線LAN機器の上空利用に向けた諸課題等の調査検討報告書において、  
「屋外・上空利用の開設区域の拡張を具体化していくためには、屋外・上空利用のそれぞれについて無線LAN機器の分布モデルを検討し、気象レーダーへの許容干渉値を満足する離隔距離を決定していくことが必要となる。」と記載。
- ▶ これまでの考え方(※)から、上空利用については、
  - ・ メインローブ内の同時飛行台数を10台と仮定
  - ・ 必要な離隔距離を確保し、かつ、上空30mまでの飛行となるよう制限することで、レーダーとの共用を検討した。
- ▶ 一方で、検討に当たって、作業班主任、気象庁・国交省から、
  - ・ 実態に即したモデル化が必要
  - ・ クレーン等による高所利用、有線給電ドローン等、一般的な地上高(1.5m)よりも高い位置での使用が考えられるケースの整理が必要
  - ・ ドローンの高度制限について、過去の検討時から無線LAN／気象レーダーの高度化が進んでいるため、見直しが必要との意見があった。

※気象レーダーメインローブ内の同時送信台数の考え方(上空)

- ・ 衛星システムとの共用可能台数である135万台を一様分布(8.97台)
- ・ U57のJUTMへの申請時間のうち、最大値(神奈川県)を基に算出(9.38台)
- ・ 「自律移動ロボットアーキテクチャ設計報告書」に記載の年間500万フライトから算出(6.32台)



以上を踏まえ、以下の点について条件を整理。

### 【上空利用】

- ・ 気象レーダーに影響を与えない離隔距離を確保できるエリアを開設区域として設定する必要性。
- ・ 上記条件が満たされるよう、運用調整を前提とする必要性。
- ・ 運用調整により、同時飛行台数や使用場所の管理が可能となるため、飛行高度に係る制限の必要性。

### 【地上利用】

- ・ 設置高度に係る制限の必要性。

上空及び地上利用に際し、過去の検討モデルをベースに上記整理によるモデル化／シミュレーションを行い、上空利用を追加(地上高所利用の影響を再評価)した場合の、上記整理の必要性について検証した。

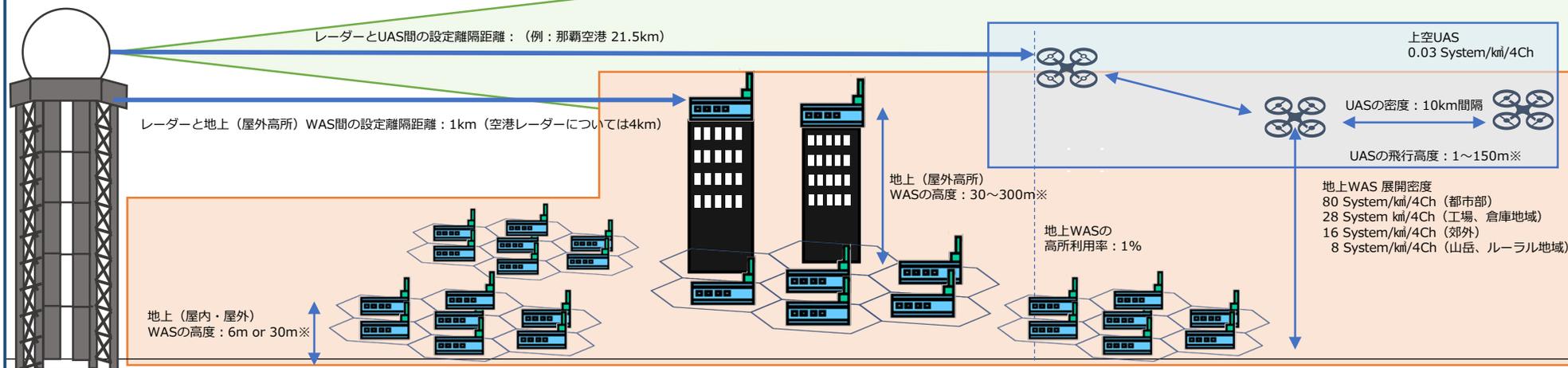
## シミュレーション条件の設定について①

## シミュレーションモデル

- ▶ シミュレーション実施モデルの条件については、平成16年11月の情通審(諮問第2014号)一部答申における参考資料7及び平成30年2月の情通審(諮問第2009号)一部答申における参考資料2の基本的な考え方を踏襲し、かつ、新たに地上(屋外高所利用)並びに上空利用を考慮し、以下のとおり設定した。

| 上空         |   | 地上             | 屋内・屋外                             | 屋外高所  |
|------------|---|----------------|-----------------------------------|---|
| UASの飛行高度※  | 1~150m  | 高所利用率          | 1%                                |   |
| 伝搬定数及び遮蔽物損 | 伝搬定数：2<br>遮蔽物損：0dB                              | WASの設置高度※      | 都市部：30m<br>住宅地、郊外等：6m             | 30~300m<br>(東京都の高層建築分布を基にモデル分布)   |
| UASの展開密度   | 0.03 System/km <sup>2</sup> /4Ch (UAS同士の離隔10km) | 伝搬定数及び遮蔽物損     | 伝搬定数：2~3.5<br>遮蔽物損：0~20dB         | 伝搬定数：2<br>遮蔽物損：0dB  |
| 設定離隔距離(上空) | 各気象レーダーの諸元に応じて個別に設定<br>(各設定離隔距離については次ページ参照)     | アクティブシステムの展開密度 | 都市部<br>工場、倉庫地域<br>郊外<br>山岳・ルーラル地域 | 20 System/km <sup>2</sup> /Ch<br>7 System/km <sup>2</sup> /Ch<br>4 System/km <sup>2</sup> /Ch<br>2 System/km <sup>2</sup> /Ch       |
|            |   |                |                                   | 80 System/km <sup>2</sup> /4Ch<br>28 System/km <sup>2</sup> /4Ch<br>16 System/km <sup>2</sup> /4Ch<br>8 System/km <sup>2</sup> /4Ch |
|            |   | 設定離隔距離(地上)     | なし                                | 1km<br>(空港レーダーについては4km)   |

※山岳レーダーの場合、UAS飛行高度・WAS設置高度はレーダー海拔高-100m地点を基準とする。



## シミュレーション条件の設定について②

## 対象レーダーの諸元等

- ▶ 平成16年及び平成30年の検討時と同様、離調周波数や周辺のWAS密度、俯角観測を行うレーダーを選定要素として、以下の7局を対象レーダーとした。各レーダーの諸元と選定理由は下表のとおり。

| 大項目  | 諸元                | 羽田空港 | 名古屋<br>地方気象台 | 牧之原※ | 車山※    | 国見山※ | 白鷹山※ | 大楠山※ |
|------|-------------------|------|--------------|------|--------|------|------|------|
| レーダー | アンテナ海拔高 (m)       | 45.6 | 73.1         | 186  | 1937.1 | 非公表  |      |      |
|      | アンテナ利得 (dBi)      | 49   | 45           | 44   | 44     |      |      |      |
|      | 最低仰角 (度)          | 0.7  | -0.1         | -0.3 | -0.2   |      |      |      |
|      | 周波数 (MHz)         | 5330 | 5358.75      | 5300 | 5320   |      |      |      |
|      | RF系損失 (dB)        | 4.7  | 5.5          | 5.5  | 4.4    |      |      |      |
|      | 許容干渉レベル (dBm/MHz) | -110 | -110         | -110 | -110   |      |      |      |
| UAS  | 設定離隔距離 (km)       | 22.6 | 10.1         | 8.8  | 10.3   |      |      |      |
| 選定理由 | 離調周波数             |      |              | ●    |        | ●    | ●    |      |
|      | 周辺WAS密度           | ●    | ●            |      |        |      |      | ●    |
|      | 俯角観測              |      | ●            | ●    | ●      |      |      |      |

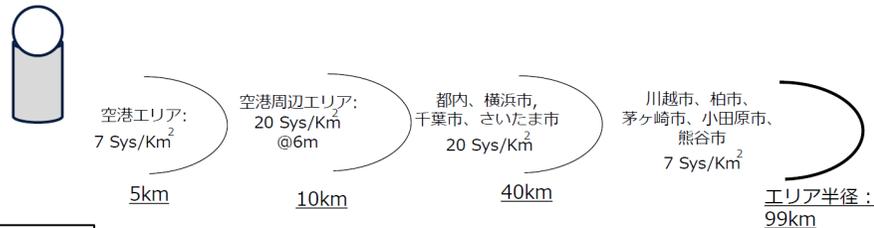
選定理由の検証については、参考資料を参照。

※山岳レーダーのため、UAS高度及びWAS設置高度はレーダー海拔高-100m地点を基準とする。

## 各レーダーのエリアモデルについて

## 各レーダーのエリアモデル

## 羽田空港



## 名古屋地方気象台



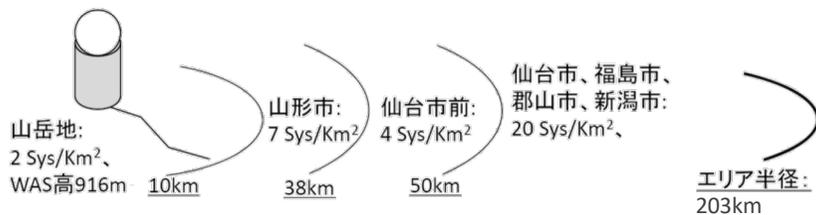
## 国見山



## 牧之原



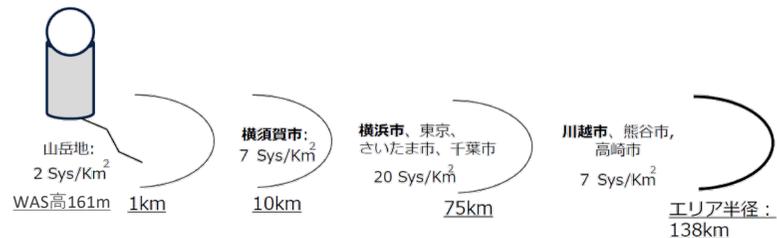
## 白鷹山



## 車山



## 大楠山



# シミュレーション結果について

## シミュレーション結果と考察

- ▶ シミュレーションの結果、下表のとおり、5.2GHz帯の上空利用に当たっては、気象レーダーに対して適切な距離を確保し、かつ、運用調整等によりドローンの間隔・台数等を管理すれば、ドローンに高度制限を設定しない場合でも、気象レーダーの許容干渉レベルに対して一定のマージンが確保されることが確認できた。
- ▶ ただし、ここでのシミュレーションの評価は、多数の無線LANからの干渉量を求めるものであり、総合的な与干渉を評価する手法として有効であるが、仮に特定の無線LANが気象レーダーに非常に接近し、かつ互いのアンテナ指向方向が正対して設置される等、特殊な設置状況を想定する場合の検討には適当でない。
- ▶ このような特殊な状況が生じることを踏まえ、実際の開設区域の設定に当たっては、気象レーダーとの位置関係に十分な配慮をする必要がある。

|              | 許容干渉レベル<br>(dBm/MHz)<br>① | レーダー受信<br>RF系損失<br>(dB)<br>② | Lsum<br>(dB)<br>③ | 建物侵入損<br>(dB)<br>④ | 平均/ピーク比<br>(dB)<br>⑤ | 許容輻射電力<br>(dBm/MHz)<br>⑥<br>(①+②+③+④+⑤) | スペクトラム<br>マスク<br>(dBm/MHz)<br>⑦ | マー <u>ジ</u> <u>ン</u><br>(dB)<br>⑥-⑦ |
|--------------|---------------------------|------------------------------|-------------------|--------------------|----------------------|---|---------------------------------|-------------------------------------|
| 羽田空港         | -110                      | 4.7                          | 84.3              | 5.6                | 1.2                  | -14.2                                   | -30                             | 15.8                                |
| 名古屋<br>地方気象台 | -110                      | 5.5                          | 74.0              | 5.6                | 1.2                  | -23.7                                   | -30                             | 6.3                                 |
| 牧之原          | -110                      | 5.5                          | 76.6              | 5.6                | 1.2                  | -21.1                                   | -30                             | 8.9                                 |
| 車山           | -110                      | 4.4                          | 80.3              | 5.6                | 1.2                  | -18.5                                   | -30                             | 11.5                                |
| 国見山          | 非公表                       |                              |                   |                    |                      |   |                                 | 7.7                                 |
| 白鷹山          |                           |                              |                   |                    |                      |   |                                 | 16.7                                |
| 大楠山          |                           |                              |                   |                    |                      |   |                                 | 7.3                                 |

# (参考) シミュレーション実施モデルの条件設定根拠について①

## 地上（屋内・屋外・屋外高所）

|                | 地上（屋内・屋外）                         | 地上（屋外高所）   | 設定根拠   |
|----------------|-----------------------------------|--|--|
| 高所利用率          | 1%                                |  | 東京都統計年鑑における「3-1 階数別4階以上及び地階を有する建築物数」及び「3-2 地域, 種類, 構造別家屋の棟数及び床面積」から、<br>$>11$ 階以上の建築物数 (16,029) ÷ (木造家屋棟数 (1,999,678) + 非木造家屋数 (818,602)) = <u>0.57%</u><br>小数第1位を繰り上げ、 <u>1%</u> として設定。<br>■参考：東京都統計年鑑 令和4年（3 建設・住居）<br>< <a href="https://www.toukei.metro.tokyo.lg.jp/tnenkan/2022/tn22q3i003.htm">https://www.toukei.metro.tokyo.lg.jp/tnenkan/2022/tn22q3i003.htm</a> > |
| WASの設置高度       | 都市部：30m<br>住宅地、郊外等：6m             | 30～300m  | 地上（屋内・屋外）については、ITU-R Rec. M.1652 Annex.6を参照。<br>地上（屋外高所）については、実際の建築物高度を考慮し設定。<br>なお、山岳レーダーにおいては、平成16年及び平成30年の検討時と同様、実際の利用ケースを想定し、WASの設置高度はレーダー海拔高-100m地点を基準とする。  |
| 伝搬定数及び遮蔽物損     | 伝搬定数：2～3.5<br>遮蔽物損：0～20dB         | 伝搬定数：2<br>遮蔽物損：0dB   | ITU-R Rec. M.1652 Annex.6を参照。<br>気象レーダーからの見通しに分布する可能性のある地上（屋外高所）については、遮蔽等がないものとして最悪値で設定。   |
| アクティブシステムの展開密度 | 都市部<br>工場、倉庫地域<br>郊外<br>山岳・ルーラル地域 | 20 System/km <sup>2</sup> /Ch<br>80 System/km <sup>2</sup> /4Ch<br>7 System/km <sup>2</sup> /Ch<br>28 System/km <sup>2</sup> /4Ch<br>4 System/km <sup>2</sup> /Ch<br>16 System/km <sup>2</sup> /4Ch<br>2 System/km <sup>2</sup> /Ch<br>8 System/km <sup>2</sup> /4Ch | 平成16年及び平成30年の検討時の条件を踏襲し、左記の密度を設定。<br>（WASが独立して稼働できる（キャリアセンスレベルを下回る）距離を考慮の上、都市部の展開密度を算出。都市部の密度を参考に、その他箇所についても設定。）   |
| 設定離隔距離（地上）     | なし                                | 1km<br>（空港レーダーについては4km）  | 地上（屋内・屋外）については、平成16年及び平成30年の検討時の条件を踏襲し、離隔なしで設定。<br>地上（屋外高所）については、最低限の離隔距離として仮で1kmに設定。<br>ただし、空港レーダーについては、航空法に基づく物件の制限を考慮し4kmに設定。<br>※実際の離隔距離（地上（屋外）及び地上（屋外高所））の設定の際には、レーダーの諸元を基に計算。  |

## 上空

|            |  | 設定根拠  |
|------------|--|---|
| UASの飛行高度   | 1~150m   | 航空法に基づく特定飛行に該当しない150mを高度上限に設定。<br>なお、山岳レーダーの場合、UASの飛行高度はレーダー海拔高-100m地点を基準とする。             |
| 伝搬定数及び遮蔽物損 | 伝搬定数：2<br>遮蔽物損：0dB   | ITU-R Rec. M.1652 Annex.6を参照。<br>地上（屋外高所）と同様、気象レーダーからの見通しに分布する可能性があるため、遮蔽等がないものとして最悪値で設定。 |
| UASの展開密度   | 0.03 System/km <sup>2</sup> /4Ch（Chに依らずUAS同士の離隔10km）<br>※現状のJUTMによる運用調整では、一律10km離れて利用するよう運用調整している。 | 下記の設定離隔距離の計算結果に基づき、最大配置台数と気象レーダーのメインローブ面積から算出。  |
| 設定離隔距離（上空） | 各気象レーダーの諸元に応じて個別に設定  | 気象レーダーのメインローブ内にUASを10km間隔で最大数配置した際、合計受信電力が気象レーダーの最小受信電力に対してI/N比 = 0dB以下となる離隔距離を個別に設定。     |

## 全体

|       |       | 設定根拠  |
|-------|-------|---|
| 建物侵入損 | 5.6dB | 平成16年及び平成30年の検討時の考え方を基に、衛星システムとの共用検討時の条件（地上利用：上空利用を1：1と想定）を考慮し算出。<br>※平成16年→（全て屋内）17dB<br>平成30年→（屋内：屋外=85：15）7.8dB（無線局うち15%が建物侵入損0dBとして算出）<br>今回検討→（屋内：屋外（地上+上空）=85：（15+15）=74：26）5.6dB（無線局うち26%が建物侵入損0dBとして算出） |

## 対象気象レーダー

|  |  |
|--|--|
| 羽田空港、名古屋地方気象台、静岡（牧之原）、長野（車山）、国見山、白鷹山、大楠山 | 平成16年及び平成30年の検討時と同様、離調周波数や周辺のWAS密度、観測仰角を考慮しレーダーを選択した。（詳細は後述） |
|--|--|

※各気象レーダーの諸元については、関係省庁合意のもと、工事設計書等を参照。  
シミュレーションでの設定仰角は、世界気象機関のデータベースに登録されている最低仰角を参照。

■参考：WMO> Radars> Japan  
<[https://wrd.mgm.gov.tr/Countries/Country\\_Detail/ZUZmSkpiSC94MTdZYBkSTivRGtyQT09](https://wrd.mgm.gov.tr/Countries/Country_Detail/ZUZmSkpiSC94MTdZYBkSTivRGtyQT09)>

※各レーダーのエリア半径については、以下の式により設定。土地区分については過去検討時のものを参照しつつ、新規エリアについては人口分布を考慮し設定。

$$d_{horizon}(km) = 4.12 \times (\sqrt{h_{radar}} + \sqrt{h_{WAS}})$$

$d_{horizon}$ : 見通し距離 (km)  
 $h_{radar}$ : レーダー海拔高 (m)  
 $h_{WAS}$ : 高所WAS高 (m)

## シミュレーションにおける各要素の影響

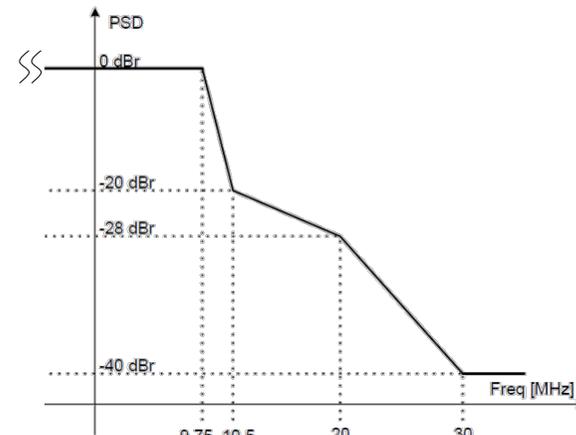
### ➤ レーダー諸元

#### ・周波数

IEEE802.11axにおけるスペクトルマスクは、右図のとおり規定されている。  
無線LANの送信出力上限 (10dBm/MHz) を考慮すると、下表 (離調周波数ごとの電力値) のとおり、**周波数の離調が小さいほど最終的なマージンが小さくなる。**  
(例：離調周波数が30MHz以上の場合、20MHzの場合と比べてマージンが12dB変化する。)

| 離調周波数   | 電力値        |
|---------|------------|
| 20MHz   | -18dBm/MHz |
| 25MHz   | -24dBm/MHz |
| 30MHz以上 | -30dBm/MHz |

(IEEE802.11a/acの離調周波数20MHz以降のスペクトルマスクも同じ数値で規定されている。)



Example transmit spectral mask for a 20MHz mask PPDU (IEEE Std 802.11ax-2021から抜粋)

#### ・レーダー高

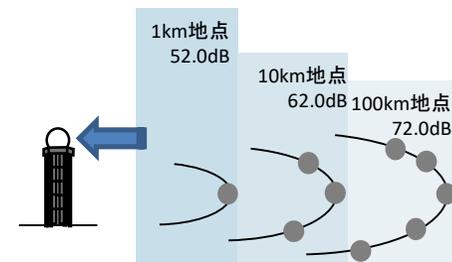
レーダー高が高くなると、エリア半径 (見通し距離) が大きくなり、よりレーダーから遠い位置のWAS/UASの影響を考慮する必要がある。  
ただし、レーダーから遠い位置のWAS/UASからの影響は、以下のとおり軽微であるため、エリア半径が大きくなることによる**レーダーへの影響は軽微**であると考える。

(例) レーダーからの距離を $d_i$ としたとき、伝搬損失は次式により求まる。

$$L(d_i) = 20 \log_{10} d_i + 20 \log_{10} f - 147.6 \text{ [dB]}$$

レーダーから1 km/10km/100km地点の円周上にWASを最大数配置した場合の影響は、下表のとおり。

| レーダーからの距離 | 距離による損失(1台あたり)※ | 円周上のWAS台数 (1 System/kmの場合) | 合計      | (累積)      |
|-----------|-----------------|----------------------------|---------|-----------|
| 1 km      | 60 dB           | 6.28 System                | 52.0 dB | (52.0 dB) |
| 10 km     | 80 dB           | 62.8 System                | 62.0 dB | 51.6 dB   |
| 100 km    | 100 dB          | 628 System                 | 72.0 dB | 51.5 dB   |



1km地点の合計値に10km/100km地点の合計値を足し合わせた場合でも、0.5dBの変化しか生じない。

※上記のとおり、レーダー近傍のWAS/UASからの影響が支配的であるため、レーダー高が低いかつ俯角観測の場合については別途考慮する。

## シミュレーションにおける各要素の影響

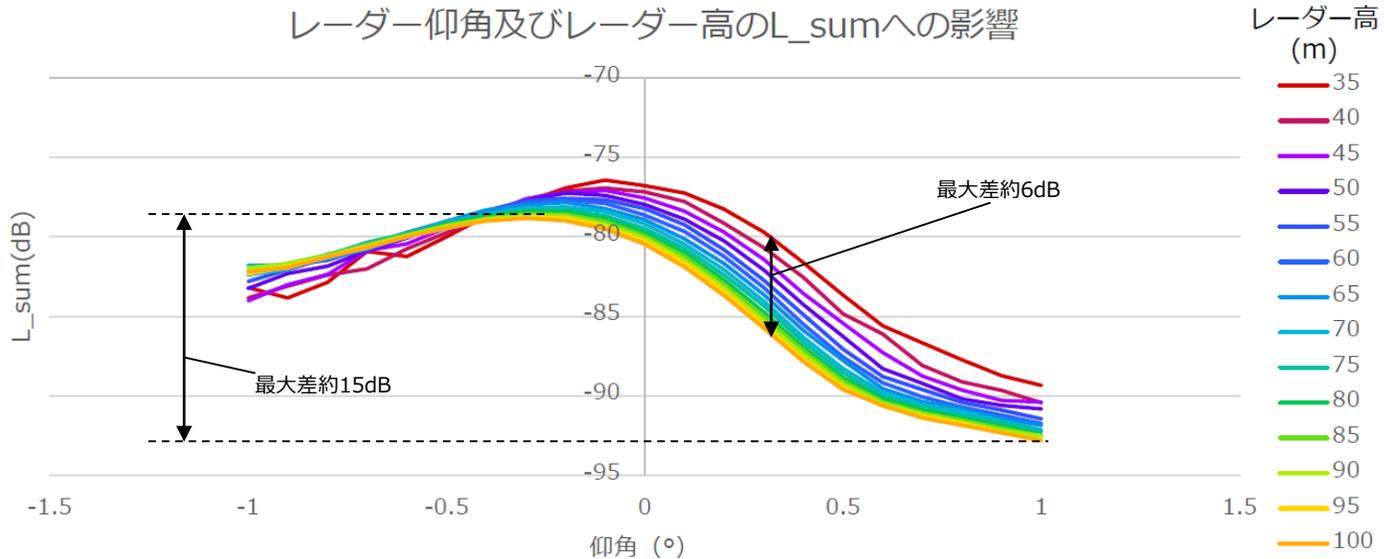
### ➤ レーダー諸元

#### ・ 最低仰角

仮想モデルにおいて、レーダー仰角及びレーダー高をパラメータとし、Lsumへの影響を検証した。

シミュレーションの結果（下図）から、今回設定した条件では、

- ① 同一仰角において、アンテナ高を変化させることによりLsumが最大6dB程度の振れ幅を持つに対し、
  - ② 同一アンテナ高において、仰角を変化させることによりLsumが最大15dB程度の振れ幅を持つことが確認できた。
- 以上から、アンテナ高の高低による変化よりもレーダー仰角による変化の方がレーダーへの影響が大きく、今回設定した条件では、 $-0.3 \sim -0.1^\circ$  付近にLsumのピークが確認できた。



<上記検討における仮想モデル諸元> 赤字部分の変動による影響

| レーダー    |        |        |         | エリア半径                       | UAS    |                  |                                | 高所WAS  |         |       | 地上WAS                                   |      |
|---------|--------|--------|---------|-----------------------------|--------|------------------|--------------------------------|--------|---------|-------|---|------|
| アンテナ高   | アンテナ利得 | 最低仰角   | 周波数     |                             | 設定離隔距離 | 高度               | 展開密度                           | 設定離隔距離 | 設置高度    | 高所利用率 | 展開密度                                    | 設置高度 |
| 35~100m | 49dBi  | -1°~1° | 5365MHz | 22.7km~41.2km<br>※アンテナ高から算出 | 21.5km | 1~150m<br>(一様分布) | 0.03<br>System/km <sup>2</sup> | 1km    | 30~300m | 1%    | 20<br>System/km <sup>2</sup><br>※都市部モデル | 30m  |

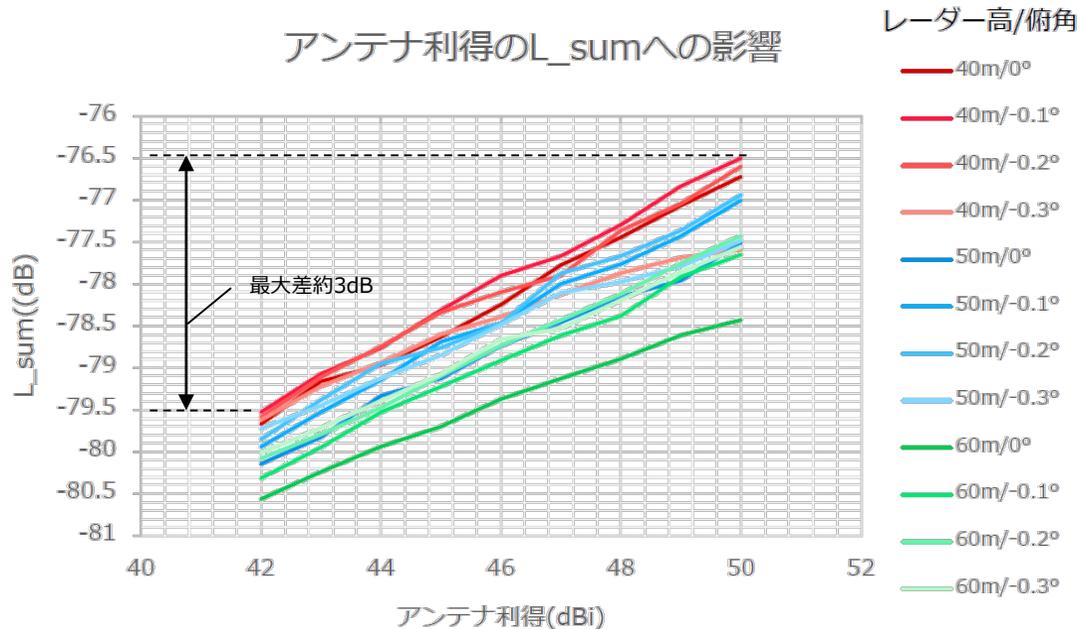
シミュレーションにおける各要素の影響

➤ レーダー諸元

・ アンテナ利得

仮想モデルにおいて、アンテナ利得、レーダー高及び最低仰角をパラメータとし、Lsumへの影響を検証した。  
シミュレーションの結果（下図）から、今回設定した条件では、

- ① アンテナ利得が大きい方がLsumの値が小さくなるが、これはレーダー高及び最低仰角の設定に依らないこと、
  - ② アンテナ利得を変化させることによるLsumの振れ幅は最大3dB程度であることが確認できた。
- 以上から、アンテナ利得の変化によるマージンへの影響は軽微であると考える。



<上記検討における仮想モデル諸元> 赤字部分の変動による影響

| レーダー   |          |          |         | エリア半径                       | UAS    |                  |                                | 高所WAS  |         |       | 地上WAS                                   |      |
|--------|----------|----------|---------|-----------------------------|--------|------------------|--------------------------------|--------|---------|-------|---|------|
| アンテナ高  | アンテナ利得   | 最低仰角     | 周波数     |                             | 設定離隔距離 | 高度               | 展開密度                           | 設定離隔距離 | 設置高度    | 高所利用率 | 展開密度                                    | 設置高度 |
| 40~60m | 42~50dBi | -0.3°~0° | 5365MHz | 22.7km~41.2km<br>※アンテナ高から算出 | 21.5km | 1~150m<br>(一様分布) | 0.03<br>System/km <sup>2</sup> | 1km    | 30~300m | 1%    | 20<br>System/km <sup>2</sup><br>※都市部モデル | 30m  |

### シミュレーションにおける各要素の影響

#### ➤ WAS/UAS展開密度

##### ・ WAS展開密度

同一エリア内のWAS台数（WAS展開密度）が増加した場合の影響を検証する。

仮に一定距離上にWASを配置し、その密度を変化させた場合の合計損失の変化は以下のとおりであり、

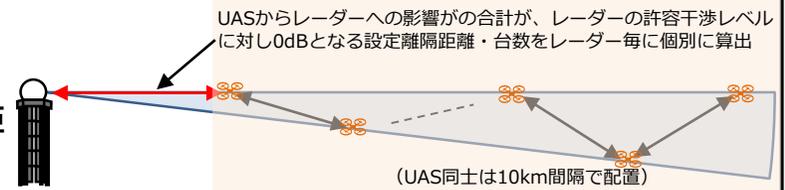
**WAS展開密度が増加することによるレーダーへの影響は大きい。**

| レーダーからの距離 | 距離による損失(1台あたり)※ | 円周     | 密度           | 円周上のWAS台数    | 合計      |
|-----------|-----------------|--------|--------------|--------------|---------|
| 1 km      | 60 dB           | 6.28km | 2 System/km  | 12.56 System | 49.0 dB |
|           |                 |        | 4 System/km  | 25.12 System | 46.0 dB |
|           |                 |        | 7 System/km  | 43.96 System | 43.6 dB |
|           |                 |        | 20 System/km | 125.6 System | 39.0 dB |
| 10km      | 80dB            | 62.8km | 2 System/km  | 125.6 System | 59.0dB  |
|           |                 |        | 4 System/km  | 251.2 System | 56.0dB  |
|           |                 |        | 7 System/km  | 439.6 System | 53.6dB  |
|           |                 |        | 20 System/km | 1256 System  | 49.0dB  |
| 100km     | 100dB           | 628km  | 2 System/km  | 1256 System  | 69.0dB  |
|           |                 |        | 4 System/km  | 2512 System  | 66.0dB  |
|           |                 |        | 7 System/km  | 4396 System  | 63.6dB  |
|           |                 |        | 20 System/km | 12560 System | 59.0dB  |

密度10倍 → 10dB

##### ・ UAS展開密度

シミュレーションにおいては、各レーダーの諸元をもとにメインローブ内の全てのUASからのレーダーへの影響の合計が、レーダーの許容干渉レベルに対し0dB、かつ、UAS同士が10kmの離隔を確保するよう、必要な設定離隔距離・台数をレーダー毎に個別に算出していることから、**レーダー毎に密度が大きく変化するものではない。**



以上の検証を踏まえ、（平成16年及び平成30年の検討時と同様、）「**離調周波数が小さい**」、「**レーダー周辺のWAS密度が高い**」、「**俯角観測を行っている（かつLsumのピーク付近となる）**」レーダーサイトを選択し、シミュレーションの対象とした。